

Technical Article

数据中心不断演进以满足 AI 的巨大电力需求



Brent McDonald, systems and applications engineer, Texas Instruments



随着大型语言模型彻底改变我们访问数据的方式，人工智能 (AI) 的进步正在颠覆各行各业及社会对数据中心计算资源的运用模式。我们正逐步进入能够直接向 AI 提问并获取详尽答案的时代，这与向真人提问无异，而非仅仅在搜索引擎中输入特定关键词。当然，这仅是 AI 能力的冰山一角。AI 还能编写代码、生成图像和视频、完成会议记录与纪要。为实现所有这些 AI 功能，需要的电力急剧攀升。

要提供如此大的电力并确保 AI 能够充分发挥其潜力，需要重新构想数据中心的 IT 服务器机架结构，以及获取与输送电力的最佳方式。本文将深入探讨三个核心议题：数据中心如何获取电力并输送至执行计算任务的服务器功能；为何必须改变配电架构才能满足快速演进的 AI 计算与电力需求；以及如何实现这种变革。

图 1 展示了 IT 服务器机架级电力需求随时间的变化趋势。图 1 预计，到 2028 年单个 IT 机架将需要 1.5MW 的电力，这是当前服务器机架所耗电力的 10 倍。

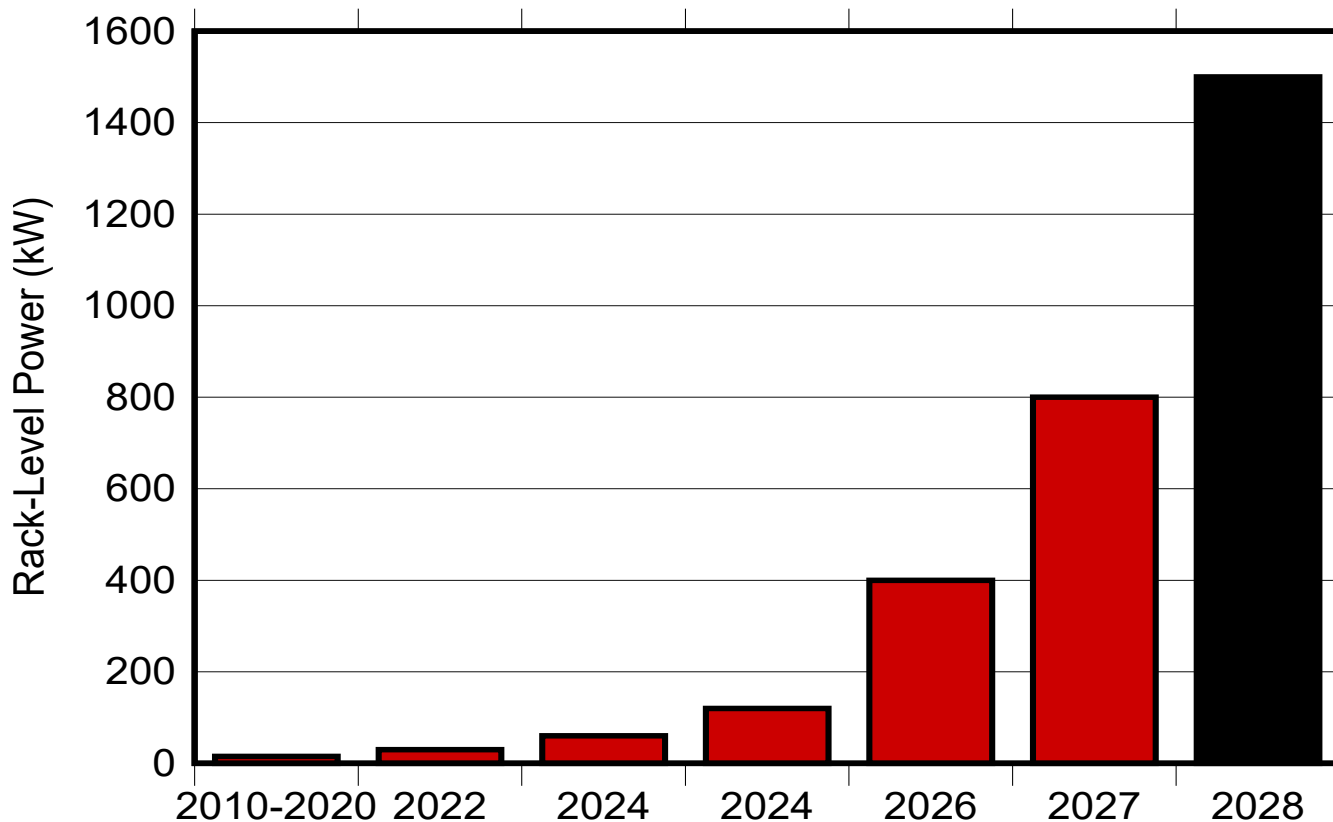


图 1. 机架级电力需求

演进简史

为理解数据中心与服务器内电力输送网络所发生的巨大变革，我们有必要先回顾一下当前的架构。图 2 所示为第一代配电架构，自 20 世纪 90 年代至今，该架构一直在服务器和数据中心领域占据主导地位。图 2 的左上区域为来自交流电网的三相交流电。此电力通过变压器从约 13kV 的“中压”降为 480V 交流线电压。不间断电源 (UPS) 为此电压提供缓冲。

当交流电网断电时，UPS 利用本地蓄电池和逆变器功能维持数据中心服务器的运行，直至自动转换开关 (ATS) 或静态转换开关 (STS) 启动备用发电机接管供电。480V 交流线电压相当于 277V_{AC} 相电压。

将 277V_{AC} 的三相电力输送至 IT 服务器机架后，电源单元 (PSU) 将执行功率因数校正 (PFC) 并生成稳定的 12V 输出，以便分配至服务器 IT 托盘。这种 12V 配电电压适用于第一代架构，为各种负载、电压稳压器和其他负载点稳压器 (PoL) 供电，产生电压以为整个服务器托盘中使用的处理器、存储器和通信集成电路供电。当总机架功率约为 10kW 至 20kW 时，这种架构运行良好。然而，随着对更高计算能力的需求增加，支撑这些计算功能所需的电力也在增加。

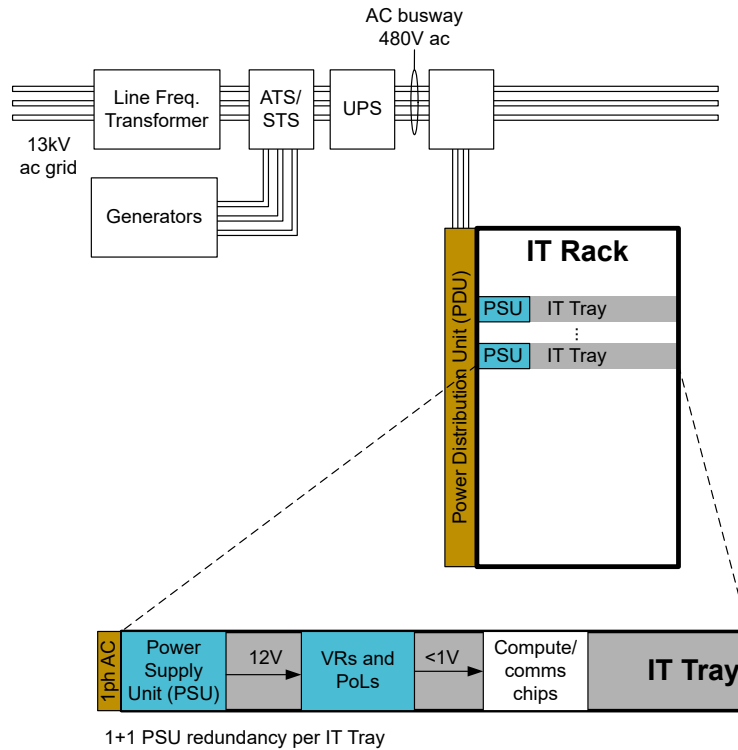


图 2. 第一代传统机架服务器

图 3 展示了数据中心配电架构的下一代演进。从图 3 的左上区域可见，此架构起始于相同的中压输入电源。与第一代架构类似，变压器将三相 13kV 转换为 480V_{AC} 线电压。此架构不再采用 UPS，而是将等效的 277V_{AC} 相电压直接输送至 IT 机架内部的本地 PSU。这些 PSU 不再专用于每个服务器托盘，而是整合在统一的电源架中。在此背景下，电源架本质就是一组电源，其输出共同承担 IT 设备的负载需求。

N+1 配置中的每个电源架通常包含六个 PSU，以实现冗余。可通过添加电源架来满足 IT 机架的总电力需求。这些电源架输出 50V_{DC} 总线电压，通过沿服务器机架背面铺设的大电流汇流排分配至各个 IT 托盘。一些第二代装置保留了 UPS 功能，而其他装置会将其移除（如图 3 所示）并替换为本地电池备份单元 (BBU)，使 50V_{DC} 总线维持供电，直至电源恢复或备用发电机接管供电。在某些情况下，电容器架或电容器备用单元 (CBU) 有助于消除与任何电源中断相关的过大电压瞬变和电流瞬变。每个 IT 托盘内的 50V 总线连接到本地中间总线转换器，产生为 IT 托盘中系统负载供电所需的 12V 电压。

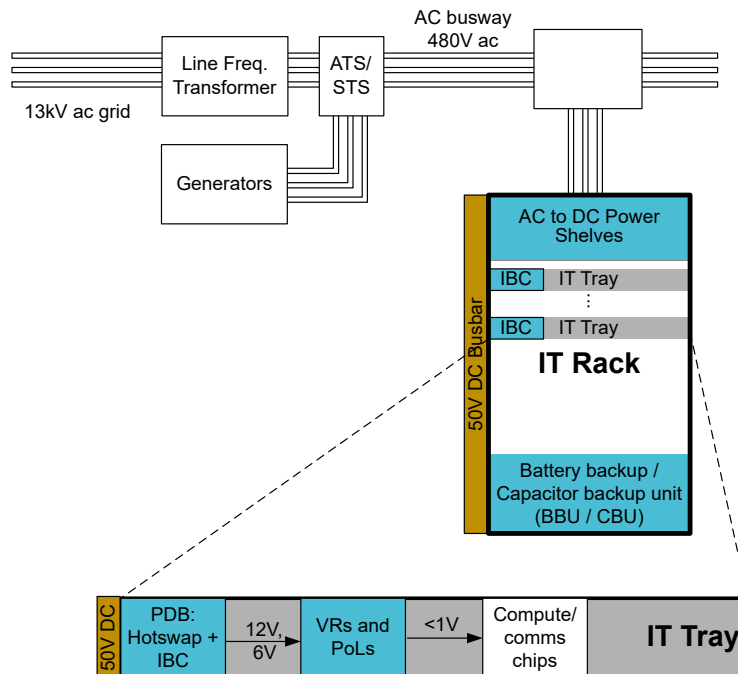


图 3. 第二代 — 云与 AI 计算

第二代架构使 IT 机架负载能力突破第一代架构限制，实际负载可达 100kW 级别。一旦所需的总功率开始达到 200kW 左右，配电损耗就会显著增加，导致进一步提升功率变得不切实际。

AI 数据中心电力输送

负责运行高级 AI 模型的数据中心机架预计在 2028 年前突破 1MW 功率。假设汇流条电压为 50V，在第二代架构中配送这一功率需要产生 20,000A 的电流。输送如此大电流所需的汇流条将会很重、成本高昂且不切实际。因此，新型 AI IT 服务器机架采用 800V_{DC} 或 ±400V_{DC} 的更高电压总线进行配电，可以将汇流排的大电流要求从 20kA 降低到 1.25kA。这种量级的电流降低将有助于保持较高的整体电力输送效率，并支持使用体积更小、密度更低的铜汇流排。图 4 展示了这一架构。

第二代架构的电源架被侧装式电源舱取代，侧装式电源舱将三相 480V_{AC} 电网电压作为其输入。侧装式电源舱将此输入转换为 800V_{DC} 或 ±400V_{DC} 总线电压并配送到一个或多个 IT 服务器机架。侧装式电源舱现在还包括 BBU。除了提高配电效率，第三代架构还在 IT 机架中为计算功能提供了更多空间。

从某种意义上讲，提升 IT 服务器机架的计算密度比解决配电问题更为关键。为了让 AI 发挥最佳功能，基于 AI 的 IT 机架会使用数百个处理器来快速处理所需的计算量。这些处理器需要能够在高密度的封装空间中相互通信。从 IT 机架中移除大部分电源转换功能后，可以在更小的空间内安装更多的处理器。现在，机架中的每个 IT 托盘都以此 800V_{DC} 或 ±400V_{DC} 总线电压作为输入。然后，托盘中的中间总线转换器将该电压转换为 IT 托盘上的配电电压。根据所选架构，配电电压可以是 48V、12V 甚至 6V。

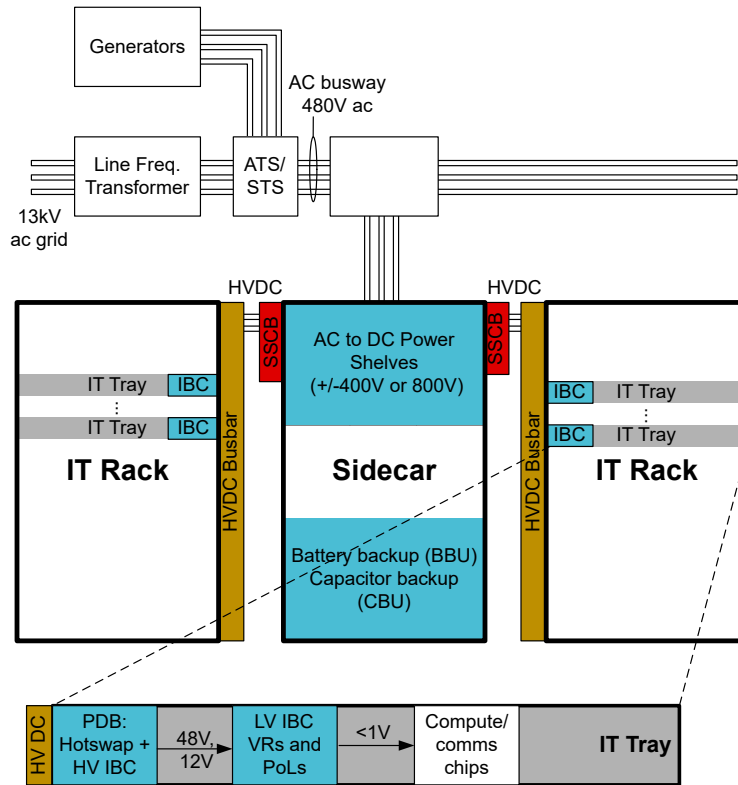


图 4. 第三代 — AI 计算直流配电侧装式电源舱

未来将如何发展？

尽管第三代架构可以提升配电效率并显著增加 IT 机架内的计算密度，但这样做的代价是会占用数据中心 IT 机房的更多空间。因此，数据中心演进的下一步是将侧装式电源舱的 AC/DC 电源转换功能从 IT 机房迁移至配电室。

图 5 展示了第四代架构的规划方案。在此架构中，侧装式电源舱保留 BBU 功能，而 AC/DC 转换功能则移入固态变压器 (SST)。第一、二、三代架构的输入电压均为电网提供的 13kV 中压。该电压被变压为三相 480V_{AC} 配电总线电压，然后转换为直流配电总线电压。SST 同时取代了 13kV 变压器和 480V_{DC} 至 800V_{DC} 或 ±400V_{DC} 电源转换环节。SST 在单个电力转换阶段实现 PFC 功能、电压降压和直流转换。备用发电机现在需要连接至中压节点，或通过 AC/DC 转换器接入 SST 输出端。最终实现了更高效的配电网络，并为 IT 机房腾出更多计算空间。

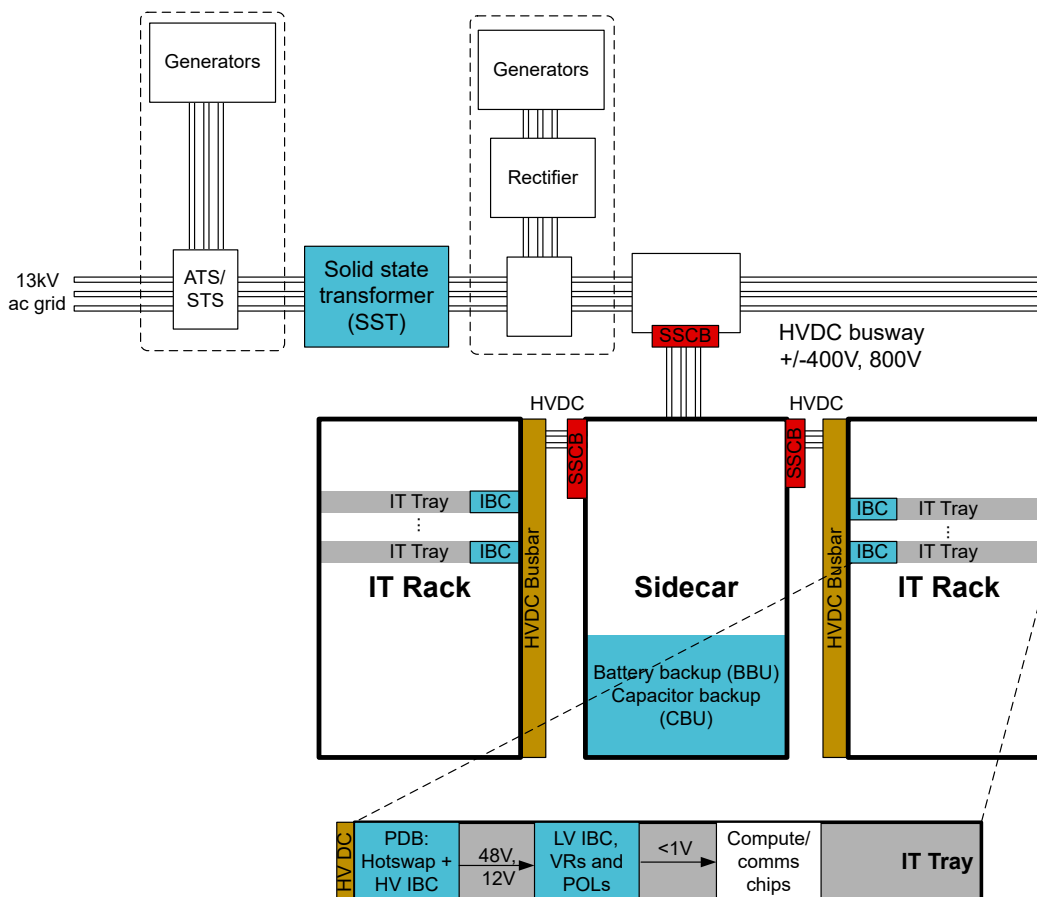


图 5. 第四代 — AI 计算 SST 与直流配电

实现愿景的技术支撑

每一代配电架构都需要大量的精密电源转换功能。这些功能包括 PFC、800V_{DC} 或 $\pm 400V_{DC}$ DC/DC 转换、二极管 ORing、均流、热插拔、保护、控制及功率计量。先进半导体技术是确保各项功能实现极致性能与效率的关键。例如：

- 执行 PFC 并生成直流总线电压需要实时微控制器[1]。
- 实现电感器-电感器-电容器 (LLC) 和 PFC 等拓扑需要高效的宽带隙半导体开关 [2]。
- 支持功率计量、控制与保护需要精确的电流和电压检测 [3]。
- 为系统内各种隔离式开关供电需要小尺寸、高效的偏置电源 [4] 和栅极驱动器 [5]。

结语

AI 正在改变我们与信息和数据的交互方式。为了满足电力转换需求，数据中心亟需新型配电架构。

本系列的后续文章将深入解析 PSU，探讨储能，分析中间总线转换器与电压稳压器的发展趋势，以及阐释支撑这些功能的主要技术和半导体解决方案。

参考资料

1. 德州仪器 (TI) (日期不详) [C2000™ 实时微控制器](#)。访问日期：2025 年 7 月 29 日。
2. 德州仪器 (TI) (日期不详) [氮化镓 \(GaN\) 功率级](#)。访问日期：2025 年 7 月 29 日。
3. 德州仪器 (TI) (日期不详) [隔离式 ADC 网页](#)。访问日期：2025 年 7 月 29 日。
4. 德州仪器 (TI) (日期不详) [隔离式电源模块 \(集成变压器\)](#)。访问日期：2025 年 7 月 29 日。
5. 德州仪器 (TI) (日期不详) [隔离式栅极驱动器](#)。访问日期：2025 年 7 月 29 日。

其他资源

- 查阅文章：[服务器电源设计的五大趋势](#)。
- 查阅 Data Center Frontier 中的以下文章：[Grid-to-Gate: A Framework for Understanding Power-Management Challenges](#) 和 [High-Voltage DC Power: The Future of Data Center Power Architecture](#)。
- 在 DataCenter Knowledge 中了解更多信息：[High-Voltage DC: The Power Solution for AI Data Centers](#)。
- 观看视频：[±400VDC Rack Power System for ML AI Application](#)。

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月